



CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO EN ZONAS KÁRSTICAS PARA LA PROVINCIA DE VÉLEZ, COLOMBIA, IMPLEMENTANDO TECNOLOGÍAS DE ANÁLISIS GEOESPACIAL

CHARACTERIZATION OF THE GEOTHERMAL POTENTIAL IN KARSTIC AREAS FOR THE VELEZ PROVINCE, COLOMBIA, IMPLEMENTING GEOSPATIAL ANALYSIS TECHNOLOGIES

Nombre del estudiante: Jose Augusto Villegas Ibagón
Código: 3101522
Profesión: Ingeniero Ambiental/Geocientífico

Director:
Ing. Freddy León Reyes M.Ed

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
JUNIO DE 2021
BOGOTÁ-COLOMBIA**

**CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL
GEOTÉRMICO EN ZONAS KÁRSTICAS PARA
LA PROVINCIA DE VÉLEZ, COLOMBIA,
IMPLEMENTANDO TECNOLOGÍAS DE
ANÁLISIS GEOESPACIAL**

**CHARACTERIZATION OF THE GEOTHERMAL
POTENTIAL IN KARSTIC AREAS FOR THE
VELEZ PROVINCE, COLOMBIA,
IMPLEMENTING GEOSPATIAL
ANALYSIS TECHNOLOGIES**

Freddy León Reyes
Magister en Educación, Especialista en Docencia Universitaria, Ingeniero de Sistemas con énfasis en software.
Docente Facultad de Ingeniería.
Universidad Militar Nueva Granada.
Bogotá, Colombia
freddy.leon@unimilitar.edu.co

RESUMEN

Por medio del presente artículo, fue posible generar la caracterización del potencial geotérmico en zonas cársticas para la provincia de Vélez, Santander mediante la implementación de tecnologías de análisis espacial. Con la ayuda de tecnología satelital y con referentes de información secundaria, se proponen dos posibles zonas de interés geotérmico correspondientes a sistemas geotérmicos de muy baja a baja temperatura; estas zonas de interés corresponden a regiones que presentaron temperaturas superficiales superiores a los 20 °C y temperaturas medias multianuales superiores a los 2300 mm/año. Se proponen también en estas regiones, posibles zonas de recarga favorecidas por la presencia de la falla de Suárez (oriente de la provincia) y por la litología permeable correspondientes a depósitos aluviales, areniscas y cuarzoarenitas (municipio de Sucre). De esta manera, se propone un posible potencial geotérmico en la provincia de Vélez, Santander en geoformas kársticas con potencial acuífero, lo que permite identificar estas unidades como posibles fuentes de calor asociadas a la propia filtración de agua, lo que aumenta la presión de poros y por consiguiente favorece un aumento de la temperatura.

Palabras Clave: Manifestación hidrotermal, potencial hidrogeológico, potencial geotérmico, acuíferos kársticos, temperatura superficial.

ABSTRACT

Through this article, it was possible to characterize the geothermal potential in karstic areas in the province of Velez, Santander, through the implementation of spatial analysis technologies. With the help of satellite technology and based on secondary information references, two possible areas of geothermal interest are proposed, corresponding to geothermal systems from very low to low temperature; These areas of interest correspond to regions that showed surface temperatures above 20 ° C and multi-year average temperatures above 2300 mm / year. Possible recharge zones favored by the presence of the Suarez fault (eastern province) and by the permeable lithologies corresponding to alluvial, sandstones and quartz-sand deposits (Sucre municipality) are also proposed in these regions. In this way, a possible geothermal potential in the province of Vélez, Santander in karst geoforms with aquifer potential is proposed, which allows identifying these units as possible sources of heat associated with the filtration of water itself, which increases the pressure of pores and therefore favors an increase in temperature.

Key Words: Hydrothermal manifestation, hydrogeological potential, geothermal potential, karst aquifers, surface temperature.

INTRODUCCIÓN

La geotermia se ha constituido como una de las fuentes de energía renovable más importantes y menos conocidas en la industria. Por lo anterior, no es una fuente de energía que se considere al momento de realizar estudios de caracterización y búsqueda de fuentes de agua. Esta fuente de energía se encuentra almacenada bajo la superficie terrestre en forma de calor y se suele asociar con volcanes, aguas termales, fumarolas y géiseres. Los recursos geotérmicos se suelen clasificar de acuerdo con su temperatura o entalpía. Cuando son clasificados como yacimientos de alta temperatura (superiores a los 100°C), estos se aprovechan principalmente para la producción de electricidad, y en casos donde la temperatura no es tan alta, esta energía se suele utilizar en los sectores industrial, servicios y residencial (Camaro, 2018)

El término Karst es un término que se ha usado extensivamente a nivel científico e industrial para describir un tipo especial de paisaje formado por procesos de disolución en rocas solubles. En Colombia por su parte, se han reportadas cientos de cuevas, dando esto como resultado una importante distribución de los sistemas kársticos en el país. Estas geoformas están distribuidas en 21 departamentos en el país, de acuerdo con Muñoz-Saba et al.1998. Cabe resaltar que la mayoría de las manifestaciones kársticas en Colombia se encuentran a lo largo de la cordillera oriental, donde se han registrado importantes áreas kársticas y un número de cuevas significantes de interés cultural y científico (Jorge Gelvez Chaparro, 2020)

Debido a que no es un área que se haya explorado de gran manera, el estudio de la energía geotérmica se ha limitado a zonas volcánicas, límite de placas litosféricas y dorsales oceánicas; sin embargo, con los avances de la tecnología, estas condiciones han cambiado; en Santander, existe el registro de 218 geoformas kársticas georreferenciadas. Cerca del 14% del área del departamento tiene un potencial alto para el desarrollo de sistemas kársticos (Jorge Gelvez Chaparro, 2020). La provincia de Vélez, compuesta por 19 municipios (Aguada, Albania, Barbosa, Bolívar, Cimitarra, El Peñón, Chipatá, Florián, Guavatá, Güepsa, Jesús María, La Belleza, La Paz, Landázuri, Puente Nacional, Puerto Parra, San Benito, Sucre y Vélez), tiene un potencial muy interesante para la gestión y almacenamiento de agua subterránea. Debido a lo anteriormente expuesto, es un área de estudio adecuada para la búsqueda de actividad geotermal.

En esta investigación, se busca conocer el potencial geotérmico para las zonas kársticas que se han descrito en la provincia mediante imágenes satelitales. De manera puntual, se desea encontrar una relación entre la presencia de geoformas kársticas y una posible fuente de calor que permita generar actividad hidrotermal mediante análisis de temperatura superficial. Estas fuentes de calor podrán estar asociadas a las altas temperaturas generadas por contactos de las rocas con fluidos calientes. Para lo anterior, se hará uso de herramientas espaciales para el análisis de imágenes satelitales, particularmente de Landsat.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. Consecución de información y delimitación de la zona de estudio

Para buscar la información base del artículo se utilizó USGS Earth Explorer, un portal de descarga de datos abiertos brindadas por el servicio geológico estadounidense. Se descargó una imagen satelital Landsat (año 2015), seleccionada por baja nubosidad, la cual será utilizada para obtener la temperatura superficial y de este modo obtener la información de posibles factores potenciales para llevar a cabo la ejecución del estudio.

Con el software Erdas Imagine se realizó un “Layer Slack”, es decir un apilamiento de bandas para 7 de las bandas (b1b2b3b45b6b7). Una vez realizados estos apilamientos, se procede a realizar los análisis espaciales.

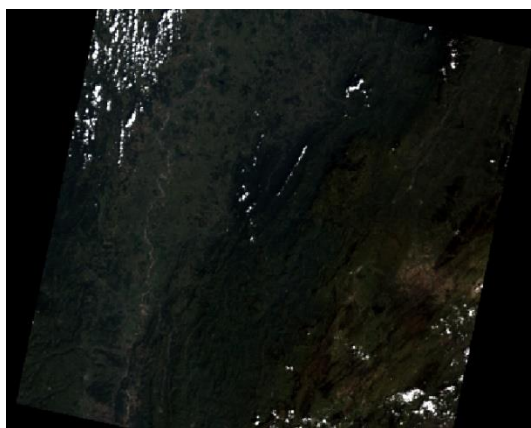


Imagen 1. Zona de estudio, tomada de USGS (Landsat 2015)

Posteriormente, se realizó una delimitación estimada para la extensión como se evidencia en la imagen 2, de la provincia de Vélez, para lo cual se descargó una capa de información geográfica de municipios con el fin de generar los polígonos del área de estudio (19 municipios constituyentes de la provincia de Vélez, al sur del departamento de Santander).



Imagen 2. Delimitación de Polígonos

1.2. Procedimiento y desarrollo

1.2.1. Caracterización local

Para desarrollar este estudio, se presenta una caracterización geológica, geomorfológica e hidrogeológica. Por su parte, se estudió la geología estructural, así como la identificación de unidades litológicas, con el fin de comprender el entorno local. Para esto, se tomará como referencia la cartografía del Servicio Geológico Colombiano. Por otro lado, se analizó la geomorfología local con el fin de identificar las unidades kársticas y se caracterizó la precipitación media multianual.

1.2.2. Análisis de Temperatura superficial

Se obtendrá un mapa de temperatura superficial para la zona de trabajo. Para esto, se hará uso de la caja de herramienta “L8 LST Tool” adaptada para ArcGIS, con la cual se podrá generar un mapa de temperatura a partir de las bandas previamente descargadas de Landsat.

1.2.3. Manifestaciones hidrotermales

Para continuar con el desarrollo propuesto, se realizará un análisis de las manifestaciones hidrotermales encontradas hasta el momento, así como de las posibles manifestaciones propuestas para este estudio según fuentes de calor y de acuerdo con la caracterización local.

1.3. Hidrogeología y fuentes hidrotermales

1.3.1. Sistemas geotérmicos

Cuando se habla de Geotermia, se está hablando del calor natural existente al interior de la tierra, geológicamente desde el manto. Este calor se traduce en una forma de energía renovable potencialmente aprovechable. Cabe resaltar que es posible encontrar calor en toda la superficie de la tierra, considerando procesos llamados como flujos de calor que facilitan la propagación de este calor a la corteza terrestre mediante los procesos de conducción (movimiento desde una zona de alta temperatura a una zona menor temperatura), convección (circulación de agua caliente) y radiación (desintegración radioactiva). Esta variación de la temperatura con la profundidad es lo que se conoce como el gradiente geotérmico (Servicio Geológico Colombiano, 2019).

Naturalmente, existen zonas asociadas a actividad sísmica o volcánica que son favorables a la acumulación de calor a nivel local, dando lugar a volcanes y manifestaciones termales en superficie con descarga de agua y gases a altas temperaturas. Particularmente, un sistema geotérmico hidrotermal se encuentra conformado por algunos elementos particulares:

- Zona de recarga de agua que permite la circulación y penetración del agua lluvia principalmente

- Fuente de calor desde rocas del subsuelo, desde donde se transfiere el agua circundante
- Reservorio o zona permeable de agua y de gases
- Capa sello o zona impermeable que permita un aislamiento de del reservorio y conserva el agua caliente
- Zona de descarga, en dónde el agua caliente escapa del reservorio y regresa a superficie en forma de vapor o líquido.

(Servicio Geológico Colombiano, 2019)

Las aplicaciones que se pueden a un fluido geotermal dependen de su contenido en calor en forma de entalpía (cantidad de energía térmica que un objeto puede intercambiar con su entorno). Se establecen cuatro categorías para la energía geotérmica:

- Sistemas de alta temperatura (más de 150 °C)
- Sistemas de temperatura media (entre 90 y 150 °C)
- Sistemas de temperatura baja (entre 30 y 90 °C)
- Sistemas de muy baja temperatura (menos de 30°C)

(Sáez, 2012)

1.3.2. Geotermia en Colombia y en el departamento de Santander

En Colombia existe actividad volcánica asociada principalmente por su ubicación espacial en el cinturón de fuego de Pacífico, la cual es una zona de muy alta actividad volcánica y actividad sísmica, localizada en la periferia del océano pacífico. Sin embargo, no todos los sistemas geotérmicos encontrados están asociados con actividad volcánica. La actividad tectónica por su parte favorece la presencia de unidades estructurales como fallas, fracturas y pliegues que pueden llegar a ser profundas y permite la filtración de agua, lo cual permite el aumento de la temperatura, debido al aumento que se da en presión (Servicio Geológico Colombiano, 2019).

Los sistemas hidrotermales y manantiales están asociados con este gradiente geotérmico. De esta manera, en los reservorios de agua caliente que alimentan estos manantiales la temperatura superficial puede variar entre 20°C y 74°C aproximadamente. En el departamento de Santander, los sistemas hidrotermales encontrados estarían relacionados con infiltración profunda en cuencas sedimentarias (zonas de acumulación de sedimentos en depresiones o hundimientos del terreno), más no a actividad volcánica. También es posible encontrar zonas de calor de forma anómala generadas por la influencia de rocas duras del basamento geológico con contenidos altos de elementos radioactivos (Servicio Geológico Colombiano, 2019).

1.3.3. Hidrogeología y geotermia

Es importante resaltar que la existencia de un sistema geotermal requiere de una fuente de calor, pero también requiere de ciertas condiciones que permitan la presencia de unidades geológicas permeables que constituyan acuíferos o reservorios y una recarga de agua adecuada al sistema. En ese sentido resulta de gran importancia conocer y estudiar los aspectos hidrogeológicos en los sistemas geotermiales. Particularmente, la interacción entre las aguas subterráneas y el gradiente térmico, permite anticipar el comportamiento de un sistema geotermal ante posibles escenarios de explotación y recarga (Mourgues, 2017).

La permeabilidad del subsuelo es muy variable y depende, entre otros factores, del tipo de depósito, granulometría, grado de compactación y cementación. En un medio rocoso, se debe analizar la permeabilidad primaria, la cual está asociada a la formación de la roca (las rocas ígneas cristalinas son bastante menos permeables que rocas sedimentarias y volcánicas y las rocas en general presentan una permeabilidad bastante menor que los depósitos no consolidados). Sin embargo, también se debe analizar la permeabilidad secundaria, asociada a procesos posteriores a la formación de la roca tales como diaclasamiento y fracturas, puede ser significativa dependiendo del grado de fracturamiento (Mourgues, 2017). A continuación, se presentan los rangos de permeabilidad esperados en algunos medios de interés:

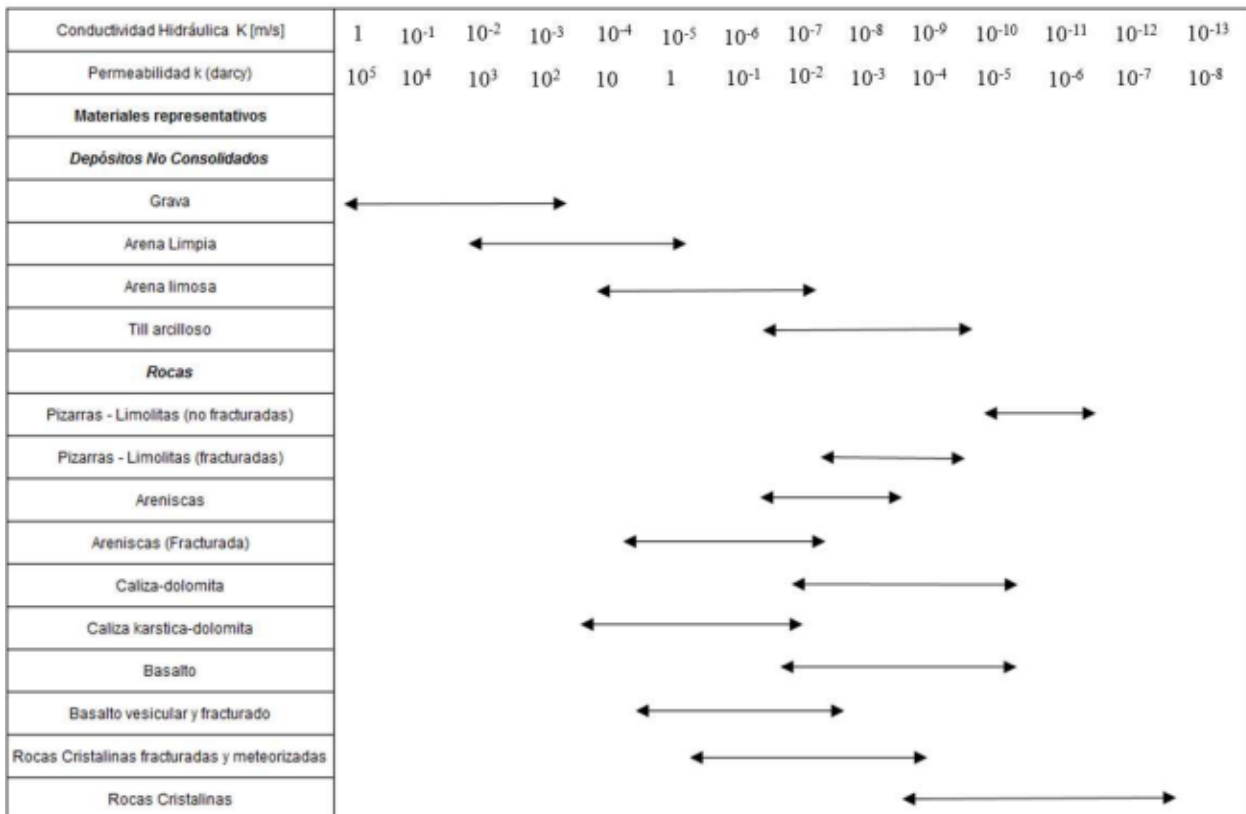


Imagen 3. Permeabilidad en medios rocosos. Modificado de *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*, Gupta&Singal. (Mourgues, 2017)

1.4. Geomorfología kárstica

Los sistemas kársticos abarcan aproximadamente el 20 % de la superficie de la tierra. El término “karst” es una palabra germana que significa roca y corresponden a aquellas geoformas que resultan de actividad geológica e intrusión de agua sobre rocas calcáreas principalmente, lo cual se favorece generalmente por erosión pluvial y por presencia de rocas altamente solubles. De esta manera, el agua infiltrada que resulta de la precipitación, se encuentra cargada de CO₂ de tal manera que, al entrar en contacto con la roca calcárea, facilita la disolución de la calcita (principal mineral asociado con rocas calcáreas). Cabe resaltar que se puede dar este fenómeno en otro tipo de roca, caso de materiales solubles como el yeso, la sal, glaciares e incluso rocas cristalinas como el granito (Rodríguez, 1997).

Los sistemas kársticos al ser formados por presencia de agua, generalmente se encuentran cuerpos de agua subterránea o acuíferos asociados. Para identificar un acuífero kárstico podemos relacionar cuatro zonas principales:

- **Zona de absorción o recarga:** El agua ingresa al acuífero de forma difusa o concentrada y una parte puede ser almacenada temporalmente.
- **Zona de circulación vadosa no saturada o de transferencia vertical:** El agua desciende en forma de torrenteras y cascadas erosionando las paredes.
- **Zona de fluctuación o epifreática:** Zona entre la zona saturada y la zona no saturada. En ocasiones está saturada en otras no (presenta un funcionamiento mixto)
- **Zona freática o saturada:** Red de conductos con alta permeabilidad y capacidad de almacenamiento.

(Yameli Aguilar Duarte, 2013)

Una vez desarrollado este proceso de meteorización química, se empiezan a formar aquellas geoformas características asociadas al efecto generado. Dentro de las principales geoformas características se encuentran las geoformas tipo lapiaz (Karren), las dolinas, las úvalas, los poljes, los valles ciegos, las simas, los sumideros, las surgencias, las cuevas o cavernas. Es muy común encontrar espeleotemas en forma de estalagmitas o estalactitas en estas geoformas (Jaime Enrique Mendoza Parada, 2009). A continuación, se describen algunas de las geoformas descritas de acuerdo con la geomorfología encontrada para la zona de estudio:

- **Cuevas o cavernas:** Corresponden al rasgo geomorfológico principal asociado con estructuras kársticas, denominadas así por su extensión. La cueva por su parte, es una cámara subterránea que solo tiene una abertura y no tiene el alcance de la luz solar, mientras que la caverna es un tipo especial de cueva que es mucho más grande y tiene múltiples aberturas o cámaras en ella.
- **Dolinas:** Corresponden a depresiones circulares o elípticas que se forman por disolución a partir de diaclasas. En la provincia de Vélez se han identificado más de 70 estructuras.

- **Úvalas:** Corresponden a dolinas inducidas por una mayor disolución en superficie.
- **Simas:** Corresponden a geoformas cilíndricas de absorción vertical y abierta que pueden alcanzar diámetros grandes y por consiguiente extensiones importantes. Se generan por fracturas y diaclasas o por colapso de dolinas.
- **Surgencias:** Están asociadas a manantiales principalmente como resultado del fracturamiento de la roca.

(Jaime Enrique Mendoza Parada, 2009)

En la zona de estudio, existen también algunas estructuras categorizadas como hoyos, tales como el hoyo del Aire, el hoyo de los papagayos, entre otros (Jaime Enrique Mendoza Parada, 2009). A continuación, se muestran algunas fotografías reportadas en la literatura para algunas de las estructuras encontradas:



Imagen 4. Fotografía de la entrada principal de la Cueva el Molino (Izq.). Espeleotemas fracturados en la cueva del indio (Der.). fuente: (Espeleocol, 2008)



Imagen 5. Fotografía de la entrada principal de la Cueva de los Indios (Izq.). Fotografía del hoyo del aire (Der.). fuentes: (Alcaldía de Vélez, s.f.) (Elizabeth Hernández Santamaría, 2020)

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

2.1. Caracterización geológica

Se desarrolló una caracterización local de la zona de estudio, con el fin de conocer y comprender mejor la geología, geomorfología e hidrogeología local. A continuación, se presenta el mapa de geología local según la nomenclatura proporcionada por el SGC.

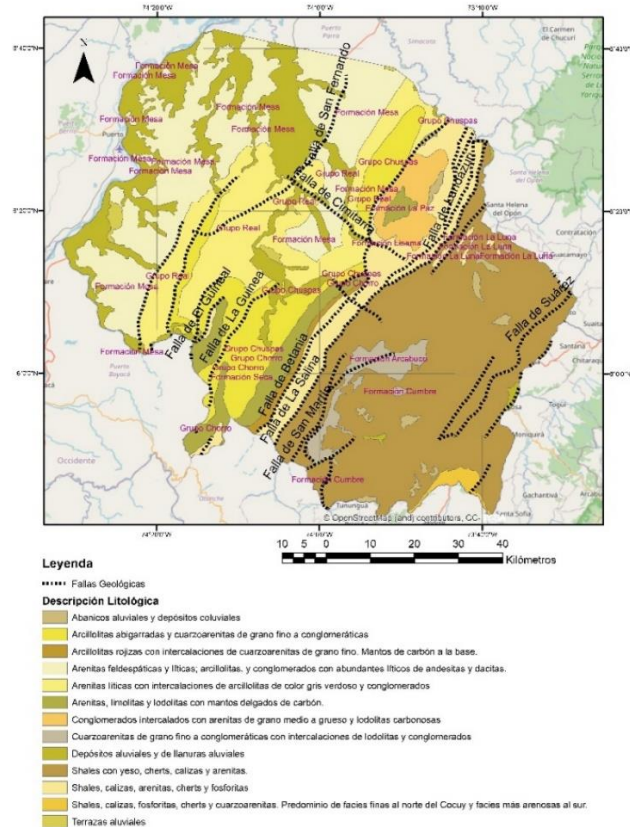


Imagen 6. Geología Local (Servicio Geológico Colombiano)

De acuerdo con la imagen 6, se encontraron unidades como la formación Cumbre, la formación Mesa, la formación Seca, la formación La Luna, formación Arcabuco, formación la Paz, formación Lisama, Grupo Chorro, grupo Chuspas, grupo Real y depósitos aluviales. Dentro de la literatura, se han descrito también las formaciones La Paja, la formación Rosa Blanca, formación Tablazo, y la formación Cumbre. Analizando la litología descrita, es importante mencionar la importancia de la formación Cumbre y La Luna, dónde la primera registra descripciones litológicas de cuarzoarenitas de grano fino con intercalaciones de lodolitas y conglomerados, mientras que la segunda consta de Shales, calizas, arenitas, cherts y fosforitas. Analizando la geología estructural, se encuentran la Falla de Suárez, la falla de Landázuri, la falla de San Martín, la falla de Betania, la falla de la Guinea, la falla de Cimitarra, la falla del Guineal, la falla de San Fernando, entre otras.

2.2. Caracterización geomorfológica

Se desarrolló también una caracterización de la geomorfología local; particularmente, para la identificación de ambientes kársticos. Colombia es un país que se caracteriza por una gran riqueza en ambientes geológicos cársticos y ecosistemas subterráneos. En el departamento de Santander por su parte, se presentan rasgos geomorfológicos de orden cárstico que deben su origen al desarrollo en rocas calcáreas y facies evaporíticas, propias de la transgresión marina cretácica.

A continuación, se presentan los relieves encontrados para la provincia:

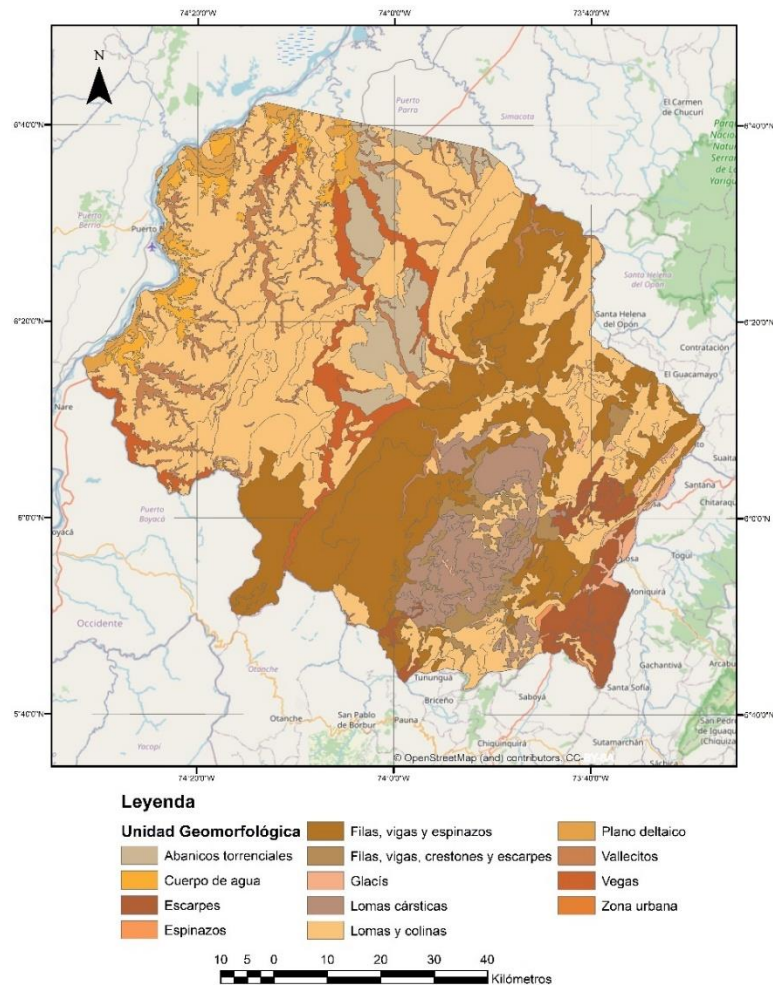


Imagen 7. Geomorfología Local (IGAC)

En la imagen 7, se observan las principales unidades geomorfológicas correspondientes a la zona de estudio cartografiadas según el IGAC. Se resaltan los valles, los escarpes, los espinazos, las filas las lomas y las colinas. Dentro de las lomas se describen lomas cársticas (descritas también como calizas, lutitas y cenizas volcánicas alteradas). Dentro de las lomas y colinas, se han reportados litologías calcáreas también. De igual manera, se presenta un mapa con las geoformas más representativas a nivel local (cuevas, dolinas, surgencias, simas y úvalas)

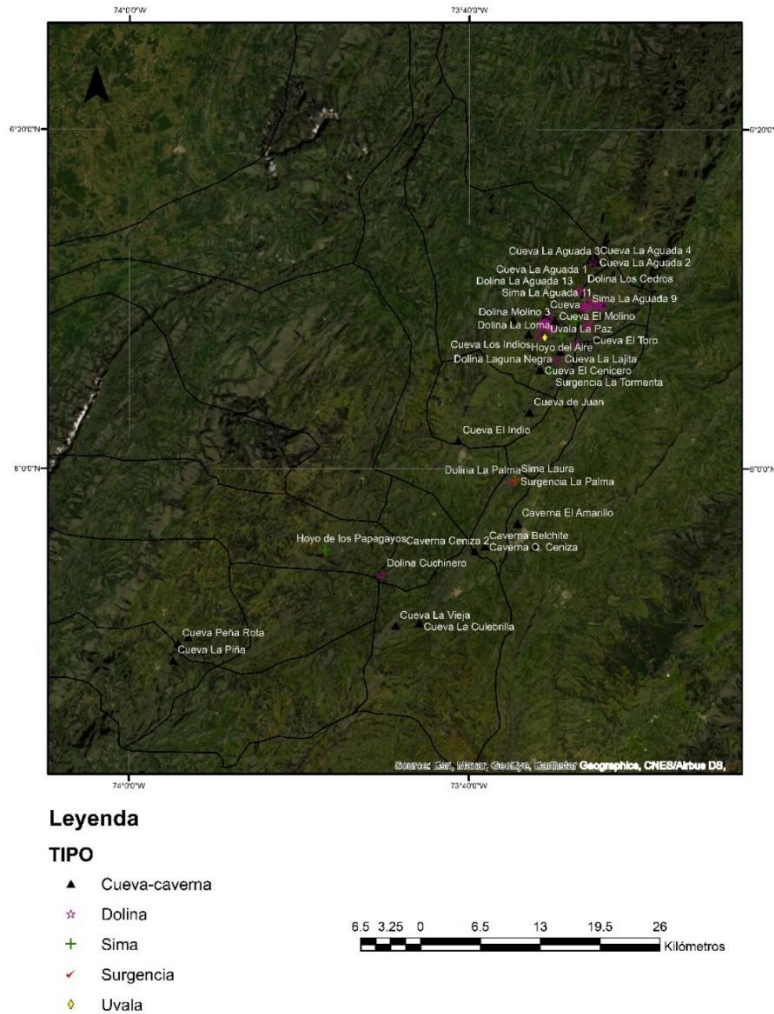


Imagen 8. Geoformas representativas

La imagen 8, presenta los resultados encontrados en cuanto a sitios de interés y geoformas representativas encontradas en la literatura. En la zona de estudio, se encuentra la cueva los indios, la cueva la Aguada, la cueva El Toro, cueva la Culebrilla, cueva el Molino, la cueva El Tigrillo, la cueva del indio, la cueva la Vieja, la cueva Peña Rota, la caverna los galápagos, la caverna Quebrada Ceniza, la caverna El amarillo, entre otros. Algunas de las dolinas reportadas en la zona de estudio son la dolina El Molino, dolina el Tigre, dolina La Aguada, dolina La Loma, dolina Carrero, dolina El Consumidero, dolina Laguna Negra, entre otras. En la zona de estudio, se encuentra la úvala La Paz como el principal referente de esta geoforma; En cuanto a simas, se encuentran la sima El Encantado, la sima la Aguada y la sima Laura dentro de los principales referentes. Por su parte, se encuentra la surgencia La Palma y la surgencia La Tormento dentro de los principales referentes de esta geoforma.

2.3. Caracterización hidrológica

Para caracterizar la hidrología local, se realizó un mapa de isoyetas para conocer la distribución de la precipitación media mensual multianual. Para esto, se trabajó con los datos correspondientes a los promedios climatológicos del IDEAM entre los años 1981 y 2010. De esta manera, se espera conocer el comportamiento de la precipitación. A continuación, se presentan las características de las estaciones meteorológicas con las cuales se realizó esta caracterización:

Tabla 1. Identificación de estaciones meteorológicas en la provincia de Vélez, Santander

CODIGO	CAT	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	ELEV	LONGITUD	LATITUD
23125060	CO	Albania	Albania	Santander	1690	73°54'48.0"W	5°45'30.0"N
24010640	PM	Bolívar	Bolívar	Santander	2260	73°46'15.0"W	5°59'10.0"N
23125120	CO	Cimitarra	Cimitarra	Santander	300	73°57'8.0"W	6°18'31.0"N
23110060	PM	Padilla	Cimitarra	Santander	100	74°19'59.0"W	6°11'37.0"N
23120200	PM	Pto Araujo Alertas	Cimitarra	Santander	159	74°4'57.0"W	6°32'2.0"N
23120010	PM	Verde La	Cimitarra	Santander	305	73°53'59.0"W	6°24'45.0"N
24010820	PM	Guavatá	Guavatá	Santander	2018	73°42'9.0"W	5°57'41.0"N
24010210	PM	Jesús María	Jesús María	Santander	1920	73°46'54.0"W	5°52'24.0"N
23125130	CO	Landázuri	Landázuri	Santander	1085	73°48'32.0"W	6°13'17.0"N
23125040	CO	Campo Capote	Puerto Parra	Santander	180	73°55'14.0"W	6°36'58.0"N
23125050	CO	Carare	Puerto Parra	Santander	168	74°3'41.0"W	6°38'58.0"N
24010670	PM	Sucre	Sucre	Santander	2270	73°47'47.0"W	5°55'11.0"N
24015270	CO	Vélez Granja	Vélez	Santander	2170	73°40'22.0"W	5°59'50.0"N

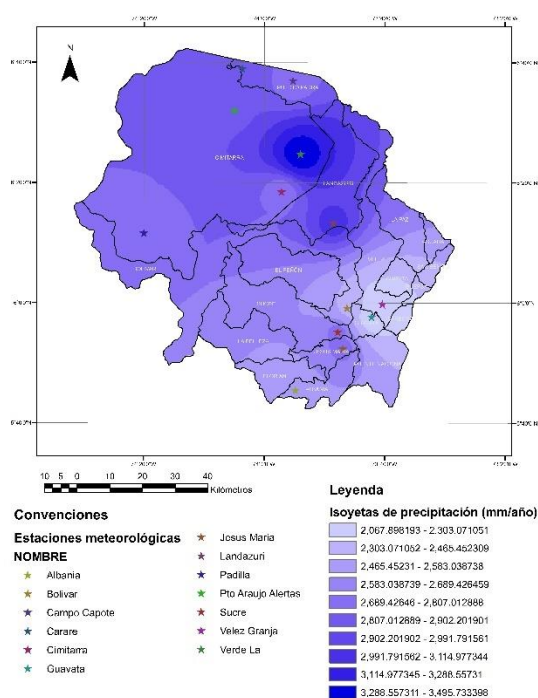


Imagen 9. Mapa de isoyetas de precipitación en la provincia de Vélez, Santander

Analizando la distribución de la precipitación media multianual presentada en la imagen 9, se encuentra que la zona con mayor registro de precipitación es el norte de la provincia (municipios de Cimitarra, Landázuri y Puerto Parra. A lo largo de la provincia, se encuentran también registros importantes en gran parte de los municipios incluidos Bolívar, El Peñón, Sucre, La Belleza, La Paz, Aguada, Jesús María y Puente Nacional con registros de precipitaciones mayores a 2500 mm/año.

2.4. Caracterización hidrogeológica (identificación de zonas hidrotermales)

Para dar continuidad con el estudio propuesto, se presenta un mapa de manifestaciones hidrotermales, de acuerdo con el inventario Nacional de Manifestaciones Termales del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

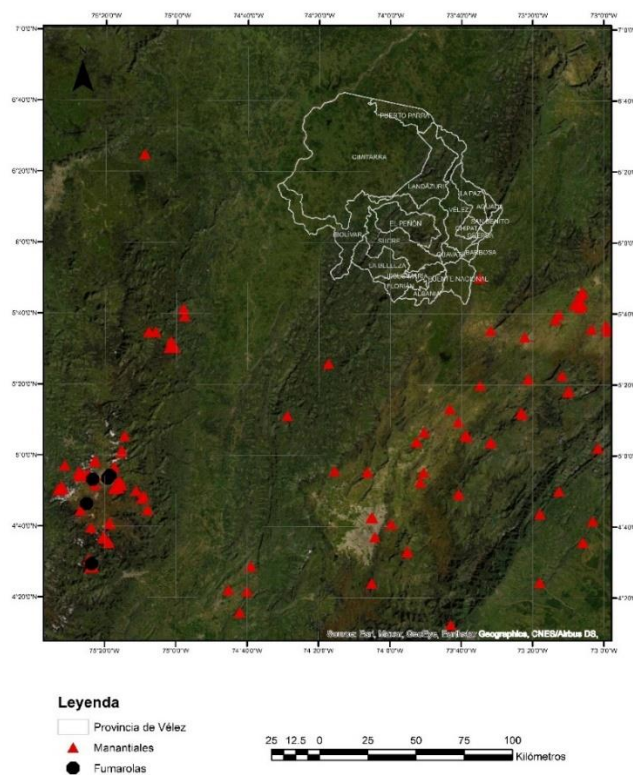


Imagen 10. Distribución de fumarolas y manantiales

En cercanías de la zona de estudio, se han reportado manantiales y fumarolas. Particularmente, en cercanías al municipio de Moniquirá, se ha reportado un manantial importante asociado a depósitos de hierro. Este manantial se caracteriza por contener agua clorurada con una temperatura aproximada de 28.6 °C y un caudal de 0.5 m³/s

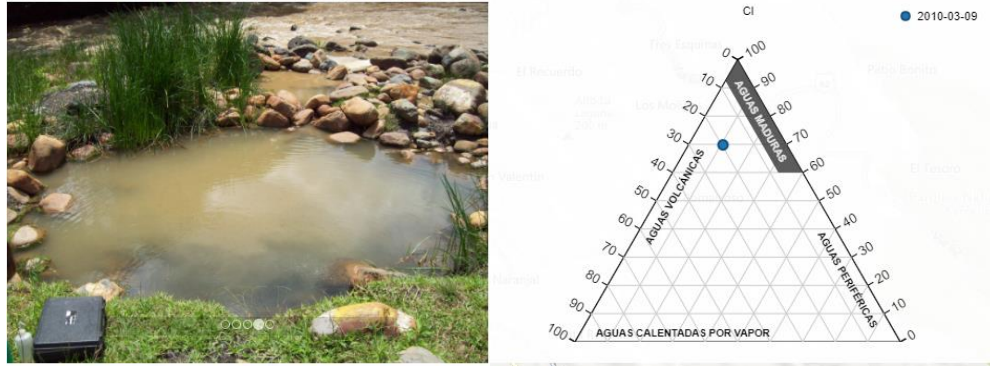


Imagen 11. Fotografía manantial El Salitre en Moniquirá (izq.). Diagrama Ternario Cl-SO4-HCO3 (Inventario Nacional de manifestaciones hidrotermales. Fuente: SGC

Por otro lado, se presenta un mapa de ecosistemas, de acuerdo con el mapa de Ecosistemas Generales de Colombia del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC):

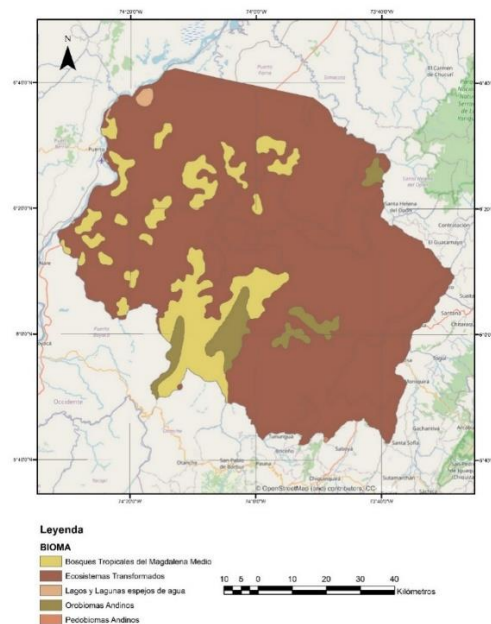


Imagen12. Mapa de ecosistemas locales (SIAC)

De acuerdo con la imagen 12, se encontraron 5 tipos de ecosistemas principales (Bosques tropicales, Ecosistemas transformados, lagos y lagunas, orobiomas andinos y pedobiomas andinos). Analizando la distribución de los ecosistemas en la provincia, se encuentra una importante cobertura de ecosistemas transformados. Estos ecosistemas corresponden a agroecosistemas colonos mixtos, áreas rurales intervenidas, agroecosistemas campesinos mixtos, agroecosistemas cañeros y se pueden clasificar dentro zonobiomas de bosque húmedo tropical y orobiomas andinos. De esta manera, se infiere una importante actividad agrícola en la región, la cual ha modificado el paisaje con el paso del tiempo.

2.5. Análisis de Temperatura Superficial

Continuando con la generación de resultados, se propone un mapa de calor (temperatura superficial) para la zona de estudio a partir de la imagen Landsat analizada.

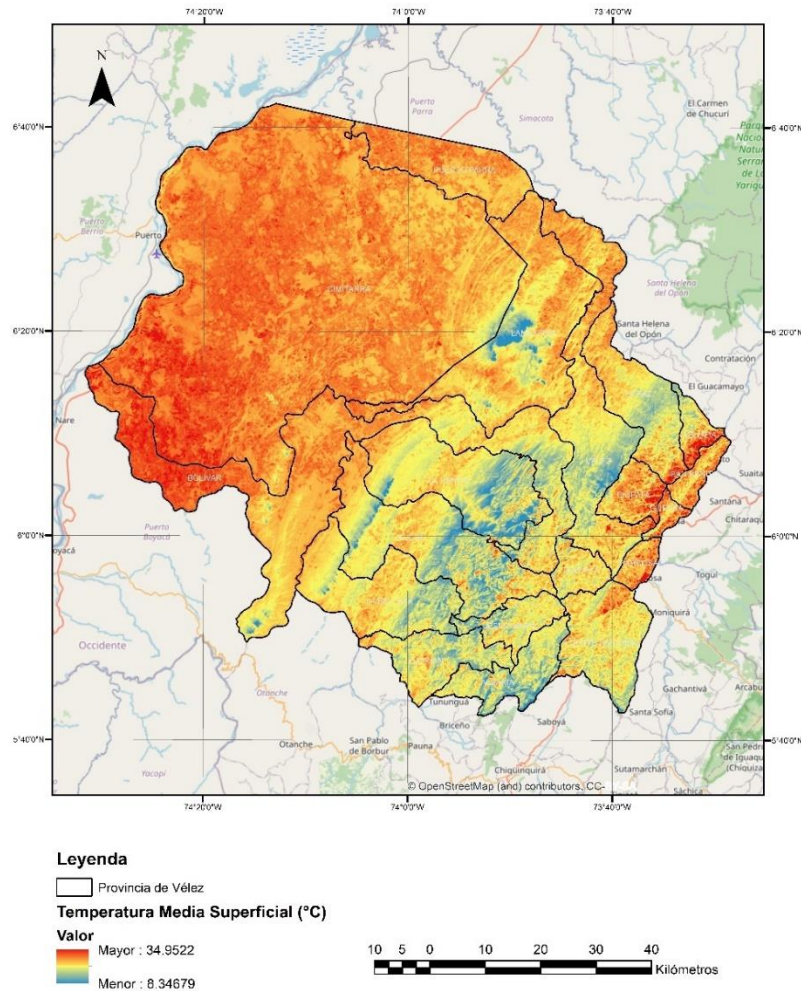


Imagen 13. Mapa de temperatura superficial Provincia de Vélez

De acuerdo con los resultados obtenidos (imagen 13), se encontró una variación en temperatura superficial entre 8 y 35 °C. Según el mapa presentado, las mayores temperaturas registradas se registraron al oriente de la provincia en los municipios de Aguada, San Benito, Chipatá, Güepsa y Barbosa y al occidente de la provincia en los municipios de Bolívar, Cimitarra y Puerto Parra. Cabe resaltar que en zonas centrales también se encontraron valores altos de forma dispersa y de manera general a lo largo de la provincia se registraron valores relativamente altos en temperatura superficial. Por su parte las menores temperaturas registradas se encontraron de forma concentrada en los municipios de La Paz (zona central), Bolívar (zona este), El Peñón (zona este), Sucre (zona central), La Belleza (zona este) y Albania.

3. CONCLUSIONES

Dentro de la zona de estudio, se encontró interés particular en la zona oriental de la provincia (Municipios de La Aguada, La Paz y Chipatá). En estas zonas se encontraron valores en la temperatura superficial de entre 26 y 35 °C. En esta zona, se registraron la mayor cantidad de geoformas (59 en total entre cavernas, cuevas, dolinas, hoyos, simas, surgencias y úvalas). En cuanto a geología, por la zona pasa la falla de Suárez en sentido NE-SW, atravesando los municipios de La Aguada, Chipatá, Guavatá, Vélez, La Paz y San Benito. La litología de estas zonas son shales con yeso, cherts, calizas y arenitas correspondientes a lomas, colinas, filas, vigas y espinazos en cuanto a geomorfología. En cuanto a precipitación, esta zona cuenta con registros que varían entre los 2300 y 2600 mm/año. Se propone una posible zona de interés geotérmico relacionada con una posible zona de recarga en la zona favorecida por la falla geológica en cuestión, que puede generar almacenamiento de agua en estas geoformas, considerando la permeabilidad que en calizas cársticas puede ser significativa (entre 10^{-2} y 10^{-3} , ver imagen 3). Estas zonas de interés pueden corresponder a sistemas geotérmicos de muy baja a baja temperatura.

Se encontró también dentro la provincia una zona con lomas kársticas al centro de la provincia. En el municipio de Sucre, se encuentra una predominancia de esta geoforma. Se destaca la presencia del hoyo de los papagayos y la presencia de la formación Cumbre, así como predominancia de permeables correspondientes a depósitos aluviales, areniscas y cuarzoarenitas. Esta zona cuenta con registros de temperatura superficial que superan los 20°C y cuenta con registros de precipitación significativos (más de 2600 mm/año). Debido a lo anterior, se propone una segunda posible zona de interés geotérmico en esta zona. Estas zonas de interés pueden corresponder a sistemas geotérmicos de muy baja temperatura.

Las zonas de interés geotérmico encontradas están asociadas a la propia filtración de agua, lo cual aumenta la presión de poros, lo que genera un aumento en la temperatura. Esta filtración a nivel local, se favorece por la recarga directa y la presencia de fallas geológicas como lo es la falla de Suárez. Estas zonas de interés se pueden clasificar como posibles sistemas geotérmicos de muy baja a baja temperatura (con registros de temperatura superficial entre 20 y 35 °C), lo cuales son de interés geotérmico a pesar de la relativamente baja temperatura.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía de Vélez. (s.f.). <http://www.velez-santander.gov.co/>. Obtenido de <http://www.velez-santander.gov.co/>: <http://www.velez-santander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Sitios-de-Interes.aspx>
- Camaro, C. A. (2018). *CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO A PARTIR DE ANÁLISIS GEOQUÍMICOS DE FUENTES TERMALES, EN EL VOLCÁN CERRO MACHÍN, COLOMBIA*. Envigado: Universidad EIA.
- Elizabeth Hernández Santamaría, S. M. (2020). *CREACIÓN DE UNA EMPRESA DE ECOTURISMO EN LA PROVINCIA DE VÉLEZ SANTANDER*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Espeleocol. (2008). *BOLETIN INFORMATIVO No. 6 – Diciembre de 2008*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia .
- Jaime Enrique Mendoza Parada, J. M. (2009). *Sistema Cárstico de la Formación Rosablanca Cretácico inferior, en la provincia santandereana de Vélez, Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Jorge Gelvez Chaparro, D. B. (2020). *Introducción al Geopatrimonio kárstico del municipio de El Peñón (Santander), Colombia*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Mourgues, J. C. (2017). *MODELACION HIDROGEOLOGICA DE UN SISTEMA GEOTERMAL ANDINO. APLICACIÓN EN CAMPO GEOTERMICO EL TATIO II REGIÓN DE ANTOFAGASTA* . Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Rodríguez, J. B. (1997). *CARACTERIZACIÓN Y FORMIJIACIÓN DE UN PIAN DE`MANEJO DEL COMPLEJO DE MÁRMOLES Y CALIZAS DEL CAÑÓN DEL RÍO ALICANTE*. Maceo: Corporación Autónoma Regional de Antioquia.
- Sáez, M. A. (2012). *CLIMATIZACIÓN DE EDIFICIOS POR MEDIO DEL INTERCAMBIO DE CALOR CON EL SUBSUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL CONTEXTO LOCAL*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Servicio Geológico Colombiano. (2019). *Geotermia en Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Yameli Aguilar Duarte, F. B. (2013). *VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS KÁRSTICOS*. Morelia: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental Universidad Nacional Autónoma.